



Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales

Grado en Ciencias Ambientales

**Estudio bibliográfico del estado del arte de
la digestión anaerobia de residuos sólidos
orgánicos y mejora del proceso mediante
pretratamientos.**

Trabajo Fin de Grado

Autor: Don Antonio Jesús Castro Granado.

Tutoras responsables: Dña. Montserrat Pérez García.

Dña. Rosario Solera del Rio.

Puerto Real, diciembre de 2018

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es realizar un estudio bibliográfico sobre el estado del arte de la digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos, comenzando con su definición y una clasificación general. A continuación, se justifica la necesidad de tratar estos residuos, así como su posibilidad de convertirlos en un recurso mediante el proceso de digestión anaerobia. Este proceso supone una oportunidad ambiental y tecnológicamente atractiva derivada del uso del biogás como energía renovable. La metodología abordada en este estudio se basa en la búsqueda y organización de la información, así como en los criterios de selección bibliográfica que se ajusten de forma explícita al tema tratado. Por otro lado, se ha analizado el proceso de digestión anaerobia explicando sus fases, las principales bacterias involucradas, los parámetros que afectan y las tecnologías que pueden llevarse a cabo en este proceso con el consumo energético asociado. Finalmente, se efectúa un análisis comparativo de los métodos de pretratamientos, entre los que destacan los pretratamientos mecánicos, térmicos, químicos y termoquímicos y biológicos, que permiten mejorar el proceso de digestión anaerobia y obtener un mayor rendimiento energético.

Palabras claves: Digestión anaerobia, pretratamientos, biogás, residuos sólidos orgánicos, valorización energética, recurso.

ABSTRACT

The objective of this work is to perform a bibliographic study about the state of the art of anaerobic digestion of organic solid waste, beginning with its definition and a general classification. Next, the need to treat these waste is justified, as well as their possibility of converting them into a resource through the anaerobic digestion process. This process supposed an environmental and technologically attractive opportunity derived from the use of biogas as renewable energy. The methodology addressed in this study is based on the search and organization of information, as well as in the bibliographic selection criteria that adjusts of explicitly form to the subject treated. On the other hand, the anaerobic digestion process has been analyzed explaining its phases, the main bacteria involved, the parameters that affect and the technologies that can be carried out in this process with the associated energetic consumption. Finally, a comparative analysis of the pre-treatment methods is effected, between which the mechanical, thermal, chemical and

thermochemical and biological pre-treatments stand out, that allow to improve the anaerobic digestion process and obtain a higher energetic yield.

Key words: Anaerobic digestion, pretreatments, biogas, organic solid waste, energy valorization, resource.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Los residuos sólidos y su clasificación	1
1.3. Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos. Los residuos como recursos. Necesidad de tratamiento de los residuos orgánicos.....	2
1.4. Valorización energética de los residuos mediante digestión anaerobia.....	3
2. OBJETIVO GENERAL	4
3. METODOLOGÍA.....	4
3.1. Definición de los objetivos	5
3.2. Búsqueda de la información.....	5
3.3. Criterios de selección bibliográfica	6
3.4. Organización de la información.....	6
4. DIGESTIÓN ANAEROBIA	7
4.1. Fases de la digestión anaerobia.....	9
4.2. Principales bacterias involucradas	11
4.3. Parámetros que afectan al proceso de digestión	12
4.4. Tecnologías y consumo energético	16
4.5. Biogás	17
5. MEJORA DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA MEDIANTE PRETRATAMIENTOS DE RESIDUOS SÓLIDOS	20
5.1. Pretratamientos mecánicos.....	20
5.2. Pretratamientos térmicos.....	21
5.3. Pretratamientos químicos y termoquímicos.....	22
5.4. Pretratamientos biológicos.....	24
6. CONCLUSIONES.....	24

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	25
8. ANEXOS	30

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El origen de los residuos se remonta a la existencia de los primeros seres vivos. De esta forma, en las sociedades rurales y primitivas, los residuos producidos eran incorporados a los ciclos biológicos ya que se trataban de residuos primarios y biodegradables que el medio podía incorporar de forma natural. Posteriormente, en las sociedades tradicionales, la cantidad de residuos producidos era mínima, y estos estaban compuestos en su gran mayoría por materia orgánica, por lo que la totalidad de residuos generados en los hogares servían como alimento para los animales o abono para los cultivos.

Con el paso del tiempo, la sociedad fue progresando y, junto con el desarrollo tecnológico, el nivel de vida aumentó. La mejora en el nivel de vida estuvo asociada a un incremento significativo de la población mundial, lo que se traduce en una mayor producción de residuos (Rico, 2015).

1.2. Los residuos sólidos y su clasificación

Por residuo se entiende “Todo elemento o sustancia no deseada que resulta abandonado por quién lo genera y que puede ser aprovechado o transformado en un nuevo bien con valor económico o de disposición final” (Ferreira, 2013). Los residuos se pueden dividir en dos grandes grupos (Ortiz, 2017):

- **Orgánicos o biodegradables:** Son aquellos residuos que la naturaleza es capaz de descomponer. Ejemplo: La madera.
- **Inorgánicos o no biodegradables:** Son aquellos residuos que no permiten su alteración ni su transformación en materia prima y su degradación natural requiere grandes intervalos de tiempo. Ejemplo: Los plásticos (Ortiz, 2017).

De la misma forma, se puede definir residuo según la Ley 22/2011 de Residuos y Suelos Contaminados como “cualquier sustancia u objeto que su poseedor deseche o tenga la intención o la obligación de desechar” (MAPAMA, 2018).

Los residuos sólidos se pueden clasificar de diversas formas, como la que se muestra a continuación (Tabla 1):

Tabla 1: Clasificación general de los residuos sólidos.

(Fuente: Ferreira, 2013)

Clasificación general de los residuos sólidos	
Según su origen	Residuos industriales, agrícolas y ganaderos, sanitarios, urbanos y bioresiduos.
Según sus características fisicoquímicas	Residuos sólidos, líquidos, emisiones gaseosas, lodos/fangos, residuos pastosos y residuos radioactivos.
Según su peligrosidad	Residuos tóxicos y peligrosos, no peligrosos e inertes.

1.3. Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos. Los residuos como recursos.

Necesidad de tratamiento de los residuos orgánicos

El aprovechamiento se define como el conjunto de fases sucesivas de un proceso en el que la sustancia inicial es un residuo y cuyo procesamiento tiene la finalidad económica de valorizar el residuo o conseguir un producto o subproducto aprovechable (Ferreira, 2013).

La maximización del aprovechamiento de los residuos originados, así como la minimización contribuye a disminuir la demanda de recursos naturales, el consumo de energía, los costes, así como la contaminación ambiental (Ferreira, 2013).

El aprovechamiento debe efectuarse siempre y cuando sea económicamente viable, técnicamente factible y ambientalmente conveniente (Jaramillo y Zapata, 2008).

A continuación, se mencionan los distintos tipos de aprovechamiento que se logran a partir del tratamiento de los residuos sólidos orgánicos (Ferreira, 2013):

- Alimentación animal.
- Compostaje.
- Biocombustibles.
- Gasificación.
- Pirólisis.
- Oxidación.

- Digestión anaerobia.

Los residuos como recursos

Este enfoque trata de emplear el biogás resultante de la digestión anaerobia de residuos como energía renovable, ya que los recursos energéticos convencionales son más limitados en la actualidad.

El proceso de producción de electricidad y calor supone una oportunidad medioambiental y tecnológicamente atrayente para usar ese biogás obtenido, estableciendo fuentes energéticas alternativas, que disminuyen tanto el calentamiento global como el efecto invernadero (Ferreira, 2013).

Necesidad de tratamiento de los residuos orgánicos

Este enfoque se basa en el artículo 5 del Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero. De esta forma, la Administración General del Estado y las Comunidades Autónomas deben establecer un programa de actuaciones para restringir los residuos biodegradables destinados a vertedero. Este programa debe incorporar medidas que permitan lograr los objetivos específicos de dichos residuos mediante el reciclaje, compostaje y otras formas de valorización como la producción de biogás mediante digestión anaerobia (Ferreira, 2013).

1.4. Valorización energética de los residuos mediante digestión anaerobia

La valorización se define como cualquier operación basada en el propósito útil del residuo al reemplazar a otros materiales que se habrían empleado para realizar una función concreta o en la preparación del residuo para cumplir dicha función en la instalación o en la economía en general (MAPAMA, 2018).

La valorización energética es un tipo de gestión de residuos que emplea el potencial energético contenido en los mismos y disminuye la cantidad de materia desechada. Por ejemplo, la digestión anaerobia de residuos orgánicos es un tipo de valorización que produce una corriente de biogás (biocombustible) y reduce el contenido orgánico.

Por ello, la valorización energética se considera una técnica que realiza esfuerzos para una gestión energética razonable, siendo la digestión anaerobia el proceso más usado (Borrue, 2017). Actualmente, existe una gran diversidad de residuos valorizables mediante digestión anaerobia, pero no todos presentan las mismas propiedades.

De esta forma, para que un residuo sea valorizable mediante digestión anaerobia debe cumplir una serie de características (Agencia Andaluza de la Energía, 2011):

- ❖ Volumen de residuo disponible.
- ❖ Potencial contaminante del residuo.
- ❖ Potencial de producción de biogás.
- ❖ Contenido en metano del biogás generado.
- ❖ Relación C/N del residuo.
- ❖ Capacidad tampón del residuo.
- ❖ Subproductos generados en la reacción.
- ❖ Cantidad de sólidos volátiles del residuo.
- ❖ Necesidad de pretratamiento.

De la misma forma, los residuos más utilizados para la generación de biogás son:

- ❖ Residuos ganaderos y de granjas.
- ❖ Residuos agrícolas.
- ❖ Residuos de la industria alimentaria.
- ❖ Residuos de matadero.
- ❖ Residuos pesqueros.
- ❖ Lodos de depuradora.
- ❖ Residuos de plantas de biocombustibles.
- ❖ Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos (FORSU).
- ❖ Biogás de vertedero (Agencia Andaluza de la Energía, 2011).

2. OBJETIVO GENERAL

El objetivo general del presente trabajo es presentar el estado del arte de los residuos sólidos orgánicos mediante digestión anaerobia y su mejora mediante la aplicación de los métodos de pretratamientos oportunos.

3. METODOLOGÍA

La metodología es el proceso que se establece en un estudio para lograr el objetivo planteado. En este trabajo se divide en cuatro fases diferenciadas y consecutivas:

- Definición de los objetivos.
- Búsqueda de la información.
- Criterios de selección bibliográfica.
- Organización de la información.

A continuación, se desarrollará cada fase:

3.1. Definición de los objetivos

En primer lugar, se ha llevado a cabo un análisis descriptivo, es decir, se han obtenido datos que explican la situación y, posteriormente, se han planteado una serie de preguntas que intentan dar respuesta al objetivo perseguido. Entre estas cuestiones destacan:

- ¿Qué es el estado del arte de los residuos sólidos orgánicos?
- ¿Cómo se aprovechan los residuos? ¿Existe alguna ventaja cuando se tratan a los residuos como un recurso?
- ¿Se considera la digestión anaerobia una buena técnica? ¿Qué ventajas e inconvenientes presentará?
- ¿Habrá alguna fase en la digestión anaerobia que limite la velocidad del proceso?
- ¿Qué parámetros ambientales y operacionales serán los más importantes de controlar?
- ¿Se generará algún producto después de realizar la digestión anaerobia?
- ¿Cómo se puede mejorar la digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos?
- ¿Son los pretratamientos un buen método para mejorar el rendimiento de la digestión anaerobia?

3.2. Búsqueda de la información

Para responder a las cuestiones planteadas anteriormente y así poder alcanzar el objetivo planteado, se ha realizado una búsqueda exhaustiva de información en internet utilizando distintos buscadores tales como Google académico y ScienceDirect. La búsqueda de información se ha desarrollado mediante el empleo de frases y palabras claves con los términos más relevantes del estudio para poder localizar distintos documentos con información de interés sobre el tema en cuestión.

Por otro lado, se ha buscado información en español e inglés, aunque se han localizado documentos en otros idiomas. Por último, se ha limitado la investigación en función del año de publicación tratando que la información fuese lo más reciente posible, aunque se

han referenciado documentos antiguos cuya información científica puede ser fiable y relevante en el contexto de la digestión anaerobia.

3.3. Criterios de selección bibliográfica

En este estudio, se seleccionaron aquellos documentos que fueran relevantes llegando a analizar aspectos tales como el título, los autores, el resumen y los resultados. Con respecto al título, se observó si este era relevante para el tema de estudio. De igual forma, de los autores se constató si tenían destreza en el tema en función del número de artículos publicados y, por último, con el resumen se analizó el contenido de cada documento y su utilidad intentando dar respuesta a las cuestiones planteadas en la primera fase, mientras que los resultados indicaban si eran aplicables al tema.

Posteriormente, se procedió a la lectura crítica de las fuentes seleccionadas previamente.

En un principio, el número de documentos compilados era 63, aunque tras efectuar la extracción de la información se ha reducido a 35, y sólo se tuvieron en cuenta aquellas fuentes que facilitasen información acerca de los aspectos generales comprendidos en la materia objeto de estudio, como son los artículos científicos, libros, tesis doctorales, páginas web, TFG, TFM y guías técnicas.

Por último, para garantizar que las revistas empleadas presentaban una alta calidad metodológica y cumplían los criterios de calidad científica, se ha verificado el índice de impacto de cada una de ellas. No obstante, aunque algunas revistas utilizadas poseen un factor de impacto bajo, se han considerado a la hora de llevar a cabo el estudio, puesto que la información que aportan es de gran utilidad.

3.4. Organización de la información

En este trabajo, se estableció una estructura lógica incluyendo la información de forma razonada y organizada, lo que implica una mejor redacción, así como una fácil comprensión del documento por parte del lector. Esta fase permitió resumir la información excluyendo todo aquello que no fuese fundamental y posibilitando que apartados como “Digestión anaerobia” o “Mejora de la digestión anaerobia mediante pretratamientos de residuos sólidos” fueran sencillos gracias a la síntesis de la información. Por tanto, se recopilaron aquellos documentos de interés en la tercera fase y, posteriormente, se ordenaron en función de la información que aportaba cada documento.

Por último, la información se iba estructurando en diferentes apartados de modo que tras haber realizado toda la lectura bibliográfica y seleccionado la información más útil se procedió a la combinación de la información de distintas fuentes y, de esta forma, se redactó el trabajo.

4. DIGESTIÓN ANAEROBIA

La digestión anaerobia es un proceso biológico en el que la materia orgánica del residuo se degrada por la acción de ciertos microorganismos hasta constituir una mezcla de productos gaseosos o "biogás" y un digestato o residuo orgánico formado por una mezcla de productos minerales (N, P, K, Ca, etc.) y compuestos de difícil degradación denominados lodos (Fernández, 2013). Bajo condiciones anaerobias, los distintos grupos bacterianos interaccionan entre sí, formando una comunidad microbiana, a la que contribuye cada población para su mantenimiento (Díaz-Báez, et al., 2002).

El tratamiento de los residuos sólidos orgánicos mediante esta tecnología abarca varios problemas como (Díaz, 2013):

- ❖ Propiedades físicas desfavorables.
- ❖ Pretratamientos.
- ❖ Sobreproducción de residuos peligrosos.

Por otro lado, mediante este proceso, se pueden tratar un gran número de residuos (Campos y Flotats, 2004):

- Residuos agrícolas y ganaderos.
- Lodos de depuradoras biológicas.
- Residuos industriales orgánicos.
- Aguas residuales municipales e industriales.
- Fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (Campos y Flotats, 2004).

La digestión anaerobia engloba dos objetivos principales (González, 2014):

- La gestión de residuos para su posterior utilización, transformándose en un subproducto.
- El aprovechamiento energético de dichos residuos, alcanzándose una rentabilidad con la producción de biogás.

Así mismo, presenta algunos beneficios, entre los que destacan (Rodríguez, 2014):

- Reducción importante de malos olores.
- Mineralización.
- Producción de energía renovable.

De esta forma, se trata de uno de los procedimientos más adecuados para la reducción de las emisiones de efecto invernadero, el aprovechamiento energético de los residuos orgánicos y el mantenimiento y mejora del valor fertilizante de los productos manejados (Fernández, 2013).

A continuación, se presentan las principales ventajas e inconvenientes del proceso de digestión anaerobia (Tabla 2):

Tabla 2: Principales ventajas e inconvenientes del proceso de digestión anaerobia.

(Fuente: Lorenzo y Obaya, 2005)

Ventajas	Inconvenientes
Bajo consumo de energía.	No permite obtener la calidad del efluente, pero admite eliminar gran parte de los SS, DQO y/o DBO ₅ .
El material orgánico del agua residual se transforma en biogás, que puede ser incinerado para obtener energía o vapor.	Requerimiento de un lodo granular para arranques rápidos.
La producción de lodos es muy baja. De esta forma, estos se estabilizan y se pueden desecar fácilmente por gravedad.	Presencia de malos olores ocasionalmente.
Sistemas que asimilan altas y bajas cargas orgánicas.	
Remoción de materia orgánica entre el 60 y 80% según el tipo de agua residual.	
Los lodos pueden ser acumulados y conservados fácilmente.	
Posibilidad de trabajar a tiempos de retención hidráulicos muy pequeños.	
Costes de inversiones bajos.	

4.1. Fases de la digestión anaerobia

La digestión anaerobia comprende varias etapas consecutivas donde intervienen 4 grandes poblaciones de microorganismos. Estas poblaciones se caracterizan por estar compuestas de microorganismos con diferentes velocidades de crecimiento y sensibilidad a cada compuesto intermedio. El hecho de que cada fase presente diferentes velocidades de reacción implica que el desarrollo del proceso global requiera de un equilibrio que impida la aglomeración de compuestos inhibidores intermedios, como la acumulación de ácidos grasos volátiles que podrían producir una bajada del pH (Fernández, 2013).

Por otro lado, un control adecuado de las fases del proceso de digestión anaerobia permite aumentar la producción de biogás, sin que esto suponga un riesgo de inestabilidad o inhibición (Núñez-Pintado, 2017).

A continuación, se describirá brevemente las diferentes fases o etapas presentes en el proceso:

HIDRÓLISIS

En esta etapa, los compuestos orgánicos complejos son solubilizados por enzimas que excretan las bacterias hidrolíticas (Lorenzo y Obaya, 2005). La hidrólisis del material mejora propiedades como la viscosidad y la solubilidad permitiendo la degradación del producto en fases posteriores y aumentando la velocidad del proceso (Palau, 2016). La hidrólisis depende principalmente de la temperatura del proceso, del tiempo de retención hidráulico, de la composición del sustrato (% de lignina, carbohidratos, proteínas y grasas), del tamaño de partícula, del pH, de la concentración de NH_4^+ y de la concentración de los productos de la hidrólisis. Esta fase puede ser el proceso limitante de la velocidad global del proceso sobre todo cuando se tratan residuos con elevado contenido en sólidos (Reyes, 2017).

ACIDOGÉNESIS O FERMENTACIÓN

En esta fase, las bacterias acidogénicas actúan sobre los compuestos que proceden de la hidrólisis transformándolos en ácidos grasos volátiles (AGV) tales como acético, propiónico, butírico y valérico (Palau, 2016).

El material orgánico obtenido es fermentado por varios organismos, creando compuestos que pueden ser usados por los microorganismos metanógenos y compuestos orgánicos más reducidos que deben ser oxidados por las bacterias acetogénicas (Reyes, 2017).

Entre los productos de la fermentación, el acetato y el CO₂ son los que más contribuyen a la producción de metano (Li, et al., 2010).

ACETOGENESIS

En esta etapa, se lleva a cabo la degradación de algunos productos de la acidogénesis que no pueden ser empleados directamente por las bacterias metanogénicas dando lugar a productos tales como ácido acético, H₂ y CO₂ (Rey, 2014).

METANOGENESIS

Es la fase final del proceso de digestión anaerobia donde se produce la formación del biogás a partir de compuestos sencillos de carbono. Por ello, existen diferentes parámetros que intervienen en el proceso y deben ser controlados con el fin de sostener el equilibrio y la composición del biogás (Rey, 2014). De esta forma, el CH₄ es elaborado a partir del ácido acético o de mezclas de H₂ y CO₂, pudiendo crearse también a partir de otros sustratos tales como ácido fórmico y metanol (Lorenzo y Obaya, 2005).

Las arqueas metanogénicas se pueden clasificar en dos subpoblaciones dependiendo del compuesto que metabolizan (Cuesta, 2015):

- Acetoclásticas: Son aquellas bacterias encargadas de transformar el acetato, metanol y algunas metilaminas en metano produciendo el 70% del metano total.

- Hidrogenotróficas: Son aquellas bacterias encargadas de transformar el H₂/CO₂ y el ácido fórmico en metano produciendo el 30% del metano total (Cuesta, 2015). Esta población tiene un papel fundamental en la digestión anaerobia de alto contenido en sólidos y en estos casos pueden constituir el 50% de las metanógenas (Zahedi, et al., 2013).

Así mismo, el rol de las bacterias metanogénicas se determina por el tipo de sustrato disponible (Lorenzo y Obaya, 2005).

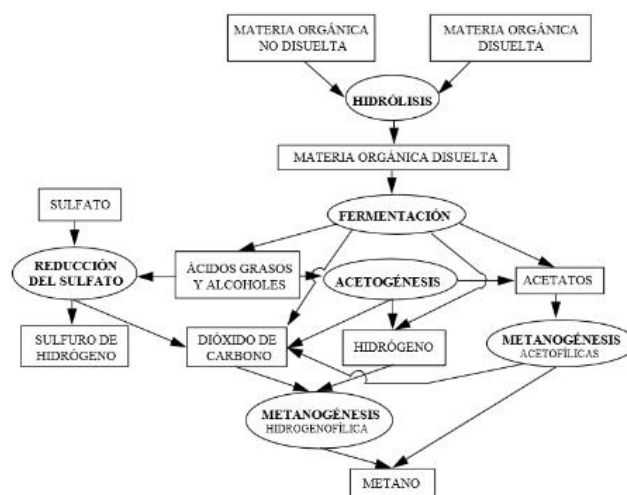


Figura 1: Fases de la digestión anaerobia.

(Fuente: Martín, 1997)

4.2. Principales bacterias involucradas

Las principales poblaciones de bacterias que actúan en cada fase del proceso de digestión anaerobia se muestran en la siguiente tabla (Tabla 3):

Tabla 3: Principales bacterias que actúan en cada fase.

(Fuente: Cuesta, 2015)

Fases	Género
Hidrólisis	Bacteroides
	Lactobacillus
	Sporobacterium
	Megasphaera
	Bifidobacterium
Acidogénesis	Clostridium
	Paenibacillus
	Ruminococcus
Acetogénesis	Acetobakterium
Metanogénesis	Arqueas metanogénicas

4.3. Parámetros que afectan al proceso de digestión

Existen un grupo de parámetros que afectan al proceso, siendo necesario su control con el objetivo de que la digestión se desarrolle en las mejores condiciones posibles (Fernández, 2013).

-Parámetros ambientales: Son aquellos sobre los que no se puede actuar de forma directa cuando el proceso está en marcha, sino que dependen de las características de la materia prima y del desarrollo in-situ de las reacciones químicas.

-Parámetros operacionales: Son aquellos que se pueden controlar y actuar sobre ellos durante el proceso de producción de biogás (Palau, 2016).

A continuación, se mostrará una clasificación de los distintos parámetros que afectan al proceso de digestión anaerobia (Tabla 4):

Tabla 4: Clasificación de los distintos parámetros que afectan al proceso de digestión anaerobia.

(Fuente: Elaboración propia)

Parámetros ambientales	Parámetros operacionales
pH	Temperatura
Potencial redox	Tiempo de retención hidráulica (THR)
Nutrientes	Razón de carga orgánica (RCO)
Tóxicos	Agitación

PARÁMETROS AMBIENTALES

pH

Es un parámetro que ejerce una gran influencia sobre la estabilidad del proceso, puesto que es una de las variables que regula la coexistencia de las poblaciones de microorganismos (Cendales, 2011). De esta forma, el pH es una variable muy habitual ya que en cada fase del proceso los distintos tipos de microorganismos presentan máxima actividad en un intervalo de pH diferente.

Por lo general, el intervalo de pH óptimo para desarrollar el proceso de digestión se encuentra entre 6,5 y 7,5, aunque puede producirse en pH menores y mayores (Ramos, 2015).

Esta variable puede afectar el desarrollo del metabolismo microbiano en algunos aspectos tales como la utilización de carbono y las fuentes de energía, eficiencia de la degradación del sustrato, síntesis de proteínas y la liberación de los productos metabólicos desde el interior de las células. Los valores de pH no solo determinan la producción total de biogás sino su composición en metano ya que valores de pH menores a 4,5 y superiores a 8,3 presentan inhibición de la actividad de todos los microorganismos implicados en el proceso, debido a que las enzimas que regulan los procesos vitales de las poblaciones microbianas son afectadas por los cambios de estado de los grupos ionizables, además se facilita la desnaturalización de sus estructuras proteicas (Cendales, 2011).

Así mismo, cuando se producen procesos de inestabilidad, los ácidos volátiles producidos por bacterias acidogénicas y acetogénicas se elaboran a una velocidad mayor de la que pueden ser consumidos por las bacterias metanogénicas. De esta manera, si el sistema no tiene suficiente capacidad tampón, el pH disminuirá drásticamente y la producción de metano se parará debido a la inactividad de las bacterias metanogénicas (Ramos, 2015).

Potencial redox

El potencial redox debe mostrar un valor suficientemente bajo para que los microorganismos metanogénicos estrictos se puedan desarrollar (Borrueal, 2017).

Nutrientes

El sistema anaerobio está caracterizado por la baja demanda de nutrientes que requiere en comparación con el proceso aerobio, debido principalmente a los bajos índices de producción de biomasa que presenta.

No obstante, dicha biomasa requiere para su producción del suministro de unos determinados nutrientes minerales, además del aporte de carbono y energía. Entre estos nutrientes cabe destacar el nitrógeno, azufre, fósforo, hierro, cobalto, níquel, molibdeno, selenio, riboflavina y la vitamina B12 (Borrueal, 2017). Dichos nutrientes se localizan en los sustratos orgánicos biodegradables en cantidades superiores para reemplazar los requerimientos de las diversas poblaciones bacterianas.

Las cantidades requeridas de estos macronutrientes en un proceso de digestión anaeróbica son dependientes de las poblaciones de microorganismos presentes y del tipo de sustrato que se degrade (Cendales, 2011).

Tóxicos

La inhibición del proceso de digestión anaeróbica por la existencia de sustancias que resultan tóxicas a las poblaciones bacterianas presentes puede suceder en varias categorías, ocasionando la disminución en la producción de biogás, deficiencia en la remoción de la materia orgánica e incluso la falla total de proceso (Cendales, 2011). Una sustancia se considera inhibitoria cuando provoca un efecto negativo en la población bacteriana o inhibe su crecimiento (Ramos, 2015). Estas sustancias tóxicas pueden aparecer en la materia orgánica o como subproductos de los procesos metabólicos de conversión bioquímica (Cendales, 2011).

PARÁMETROS OPERACIONALES

Temperatura

Es la variable fisicoquímica más relevante que afecta de forma directa al desarrollo del proceso de digestión anaeróbica (Cendales, 2011).

Existen tres rangos de temperatura establecidos para el desarrollo del proceso (Cuesta, 2015):

- Psicrofílico (<25 °C). La actividad bacteriana es baja y el tiempo de digestión puede llegar hasta los 100 días.

- Mesofílico (entre 25 °C y 45 °C). La actividad bacteriana es media y el tiempo de digestión está comprendido entre los 20 y los 60 días.

- Termofílico (entre 45 °C y 80 °C). La actividad bacteriana es alta y el tiempo de digestión se encuentra entre los 10 y los 15 días. A estas temperaturas se eliminan parte de los microorganismos patógenos, pero se corre el riesgo de que el proceso se vuelva inestable (Cuesta, 2015).

De igual forma, la temperatura daña a otros parámetros bioquímicos y fisicoquímicos del proceso como la actividad de los microorganismos, la constante de equilibrio de cada una de las reacciones químicas, la solubilidad de los gases originados en el proceso y el pH.

Por otro lado, la digestión anaeróbica realizada en el rango termofílico muestra algunas ventajas sobre el desarrollo del proceso en el rango mesofílico, tales como más altas razones de crecimiento y conversión metabólica, aunque también se asocia con mayores razones de mortandad de las poblaciones bacterianas, menor equilibrio del proceso y un requerimiento energético mayor respecto al rango mesofílico (Cendales, 2011).

Tiempo de retención hidráulico

El tiempo de retención hidráulico (THR) hace referencia al tiempo promedio de permanencia de la alimentación líquida en un digestor anaeróbico de funcionamiento continuo. Así mismo, el tiempo de retención de sólidos (TRS), muestra el tiempo de permanencia promedio de la biomasa microbiana en el interior del digestor.

Los parámetros de funcionamiento comentados anteriormente dependen del reactor que sea empleado. Por tanto, en los reactores de agitación continua, el THR coincide con el tiempo de retención de biomasa, por lo que el THR deberá ser lo suficientemente largo como para posibilitar el correcto desarrollo de las poblaciones microbianas implicadas en el proceso de digestión anaeróbica.

La importancia de este parámetro radica en que al aumentar el THR, se produce un incremento de la fracción de materia orgánica degradada, en cambio, la producción volumétrica de biogás disminuye después de que se haya superado el THR óptimo para un residuo orgánico en particular (Cendales, 2011).

Razón de carga orgánica

La razón de carga orgánica (RCO) representa la cantidad de materia orgánica que es alimentada al sistema de tratamiento de flujo continuo en términos de la demanda química de oxígeno por unidad de volumen del reactor en una unidad de tiempo constituida.

Por ello, este parámetro se puede entender como un índice del esfuerzo que supone la adición de material orgánico sobre las poblaciones microbianas presentes en el sistema de tratamiento, el cual afecta a los parámetros de funcionamiento como la cantidad de biogás total generado, la fracción de metano en el biogás, la estabilización de la demanda química de oxígeno y la alcalinidad del residuo. De esta manera, la razón de carga orgánica es un parámetro muy importante en la evaluación de la operación y en el desempeño de los sistemas anaeróbicos para el tratamiento de residuos orgánicos.

Por otro lado, una razón de carga orgánica alta requiere mayor actividad microbiana, lo cual podría ocasionar el fallo del sistema anaeróbico si el aumento en dicho parámetro es repentino y las poblaciones de microorganismos no son capaces de responder a esta variación. Por ello, el establecimiento de una razón de carga orgánica máxima en un sistema de digestión anaeróbica depende de varios parámetros entre los que se encuentran el diseño del reactor, la capacidad de asentamiento de la biomasa, el grado de actividad microbiana y las características del afluente (Cendales, 2011).

Agitación

La agitación se lleva a cabo para lograr un conjunto de objetivos en el proceso:

- Poner en contacto el influente con la masa bacteriana, y eliminar los metabolitos producidos por la metanogénesis, beneficiando la salida de los gases.
- Impedir tanto la producción de espumas como la sedimentación en el digestor.
- Evitar la formación de zonas muertas que disminuyan el volumen de operación del digestor.
- Mantener una temperatura uniforme en el digestor eliminando la estratificación térmica.

La velocidad de agitación es un elemento que puede interponerse en el avance del proceso. Por tanto, una velocidad de agitación alta (por encima de 700 rpm), puede reducir levemente la obtención de biogás por fractura de los agregados bacterianos o flóculos de bacterias (Borrue, 2017).

4.4. Tecnologías y consumo energético

Las tecnologías actuales se clasifican en sistemas discontinuos y sistemas continuos.

En los sistemas discontinuos, conocidos como sistemas bañera, el digestor se llena con sustrato fresco y se cierra herméticamente. El sustrato es degradado hasta el final del tiempo de digestión, sin añadir o extraer nada del mismo. Por tanto, la producción de biogás se produce lentamente tras el llenado y sellado aumentando hasta alcanzar un máximo y disminuyendo posteriormente. Tras el proceso, el tanque es vaciado y una pequeña parte del digestato persiste para inocular el nuevo sustrato.

En cambio, los sistemas continuos se caracterizan por una alimentación regular del digestor, ya que la misma cantidad de sustrato es incorporada y extraída diariamente.

Como resultado, se logra una producción de biogás constante y controlada que se puede acumular en un gasómetro, donde el biogás se depura mediante una serie de filtros antes de su aprovechamiento. Actualmente, los sistemas continuos son los más avanzados y habituales en digestión anaerobia de biomasa.

El biogás fabricado se puede emplear en sistemas de cogeneración donde se quema en motores de combustión interna produciendo electricidad y recuperando el calor residual, aunque también pueden utilizarse calderas para la generación de vapor o calentamiento de un fluido para la obtención de energía térmica.

La principal desventaja de este sistema es el consumo de energía necesaria para calentar los digestores en el rango de temperatura de trabajo (Palau, 2016).

4.5. Biogás

El biogás está constituido por una mezcla de gases cuyos constituyentes principales son el metano y el dióxido de carbono, el cual se obtiene como consecuencia de la fermentación de la materia orgánica en ausencia de aire por la acción de los microorganismos. De esta forma, para producir biogás, es posible emplear cualquier tipo de estiércol, ya sea de vaca, cerdo, cabra, aves e incluso residuos humanos (Reyes, 2017). Por otro lado, cabe destacar que el biogás no es absolutamente puro, ya que contiene partículas y trazas de otros gases, por lo que todas estas impurezas deben ser removidas dependiendo del tipo de utilización que tenga el biogás (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2011).

A menudo, el biogás puede ser usado como cualquier otro combustible con poder calorífico que tiene una relación directa con el porcentaje de metano contenido en la mezcla experimentando una variación entre 16500 kJ/kg y 21000 kJ/kg (Reyes, 2017).

Por último, el biogás debe sulfurizarse y secarse antes de su manejo para impedir daños a las unidades de utilización de gas (Weiland, 2009).

COMPOSICIÓN Y TIPOS DE BIOGÁS

A continuación, se muestran los valores de referencia en relación con la composición del biogás en la siguiente tabla (Tabla 5):

Tabla 5: Composición del biogás.

(Fuente: Ramos, 2015)

Compuestos del biogás	%
Metano (CH ₄)	50-75
Dióxido de carbono (CO ₂)	25-45
Vapor de agua (H ₂ O)	1-2
Monóxido de carbono (CO)	1-5
Nitrógeno (N ₂)	0-0,3
Hidrógeno (H ₂)	0-3
Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S)	0,1-0,5
Oxígeno (O ₂)	0,1-1

A diferencia del combustible fósil, el biogás no contribuye en gran medida al efecto invernadero, al agotamiento del ozono o a la lluvia ácida siendo una razón primordial por la que la digestión anaeróbica juega un papel esencial en la ejecución de los desafíos energéticos de la generación futura. Por otro lado, el rendimiento de biogás puede verse afectado por muchos factores, incluidos el tipo y la composición del sustrato, la composición microbiana, la temperatura, la humedad y el diseño del biorreactor entre otros (Khalid, et al., 2011).

Existen tres tipos de biogás dependiendo del sustrato orgánico del que proceda y de las características de las instalaciones de generación-captación de dicho biogás (Díez, 2016):

-Biogás de vertedero: Su aprovechamiento se realiza una vez sellados los vertederos de residuos sólidos urbanos (RSU) y en función de su estructura pueden presentar impurezas de siloxanos, compuestos fluorados y clorados.

-Biogás de digestores: Dentro de este tipo, se pueden distinguir tres subgrupos dependiendo del origen de los sustratos a digerir:

- Biogás de depuradoras urbanas: Se origina a partir de la digestión anaeróbica de los fangos primarios de las plantas de tratamiento de aguas residuales urbanas.
- Biogás FORSU: Se genera cuando la fracción orgánica procede de los RSU.
- Biogás Agroindustrial: Su formación tiene lugar si se digieren subproductos y residuos de los sectores agrícolas, ganaderos o agrarios (Díez, 2016).

PURIFICACIÓN DEL BIOGÁS

La purificación del biogás es importante por dos motivos principales (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2011):

- ❖ Incrementar el poder calorífico del biogás.
- ❖ Cumplir los requerimientos de algunas aplicaciones de gas (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2011).

La purificación del biogás se basa en la remoción del dióxido de carbono o del sulfuro de hidrógeno.

De esta manera, el dióxido de carbono es suprimido para incrementar el valor energético del biogás como combustible, mientras que el sulfuro de hidrógeno se elimina para disminuir el efecto de corrosión sobre los metales que se hallan en contacto con el biogás (Reyes, 2017).

USOS DEL BIOGÁS

El biogás creado en procesos de digestión anaerobia puede tener distintos usos (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2007):

- Generación de calor o electricidad en una caldera.
- Generación de electricidad en motores o turbinas.
- En pilas de combustible, haciendo una limpieza de H₂S y otros contaminantes de las membranas.
- Purificarlo e incorporar los aditivos necesarios para incluirlo en una red de transporte de gas natural.
- Síntesis de productos de elevado valor añadido como es el metanol o el gas natural licuado.
- Combustible de automoción (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2007).

El aprovechamiento energético del biogás más usual es el motor de cogeneración, mediante el cual se obtienen unos rendimientos en energía eléctrica de entre el 35% y el 40% y en energía térmica de entre el 30% y el 40% (Díez, 2016).

5. MEJORA DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA MEDIANTE PRETRATAMIENTOS DE RESIDUOS SÓLIDOS

Los pretratamientos posibilitan la liberación del carbono de la materia orgánica contenida en el sustrato, incrementan la superficie específica de la materia y solubilizan y degradan la mezcla (Fernández, 2013). En la actualidad, se están investigando nuevos pretratamientos como la aplicación de microondas o ultrasonidos, sobre todo para el tratamiento de residuos líquidos, como lodos de depuradora, purines, etc...

Generalmente, la aplicación de un pretratamiento lleva asociado un coste energético y económico, tanto de inversión como de operación. El aumento en la producción de biogás y/o ahorro de coste de inversión debe ser suficiente como para compensar el balance energético y económico (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2011).

Las características que abarcan los pretratamientos son (Fernández, 2013):

- Mejorar la digestibilidad en la hidrólisis enzimática o degradación biológica.
- Impedir la degradación o pérdida de carbohidratos.
- Evitar la formación de subproductos inhibidores para los procesos posteriores tales como la hidrólisis enzimática y la fermentación de azúcares (Fernández, 2013).

Por tanto, existen cuatro tipos principales de pretratamientos:

5.1. Pretratamientos mecánicos

Reducen el tamaño de las partículas aumentando la superficie específica disponible, lo que conlleva a la mejora del proceso biológico. De esta forma, se han observado los siguientes efectos:

- La trituración del sustrato conduce a una mejora de la producción de gas.
- La reducción del tamaño puede aumentar la velocidad de la digestión anaerobia (Mata-Alvarez, et al., 2000).

Dentro de estos pretratamientos los más destacados son:

- Trituración mecánica: Se basa en la molienda para la reducción del tamaño de partícula a nivel de malla que tiene una consecuencia mínima en los rendimientos de la hidrólisis (Fernández, 2013).
- Ultrasonidos: Actúa para modificar mecánicamente la estructura celular y la matriz del flóculo (Carrère, et al., 2010). Por tanto, se trata de un método empleado que radica en la aplicación de presión de sonido cíclico (ultrasonido) con una frecuencia variable para descomponer las paredes celulares. Durante el tratamiento con ultrasonidos, se producen microburbujas a causa de las aplicaciones de alta presión al material líquido que provocan colapsos violentos y elevadas cantidades de energía liberadas en un área reducida (Fernández, 2013). La aplicación de altas intensidades de ultrasonido a sistemas líquidos permite reacciones físico-químicas que pueden modificar significativamente la estructura de los materiales líquidos (Martínez y García, 2016).

5.2. Pretratamientos térmicos

Mejoran la eficiencia de los procesos anaeróbicos (Martínez y García, 2016), favorecen la degradación de algunas macromoléculas, solubilizan la materia orgánica (incremento de la biodisponibilidad) e higienizan la materia orgánica para disminuir o eliminar microorganismos indeseables en función de la temperatura y del tiempo (Fernández, 2013). Los compuestos orgánicos e inorgánicos son solubilizados durante el proceso reduciendo el volumen del digestor y mejorando la producción de biogás (Martínez y García, 2016). En este tipo de pretratamiento, la materia prima es calentada en un rango de 100 a 200 °C. Entre los pretratamientos térmicos pueden destacar:

- ❖ Explosión por vapor: La materia prima se expone a temperaturas entre 160-260 °C, mediante la inyección directa de vapor saturado con un intervalo de tiempo entre 1 y 10 minutos, transportando el producto a una rápida descompresión hasta presión atmosférica. Como resultado, se consigue biomasa con modificaciones físicas (desagregación y ruptura de las fibras), y químicas (despolimerización y rotura de enlaces) y una celulosa más alcanzable a la hidrólisis enzimática. Las variables que se controlan en este tipo de pretratamiento son la temperatura, el tiempo de residencia, el tamaño de partícula y la humedad.

- ❖ Agua líquida a alta temperatura o hidrotermal: Se somete la biomasa o residuo al efecto del agua caliente a una temperatura entre 100-230 °C con tiempos controlados. La finalidad de este pretratamiento es prevenir la formación de inhibidores (Fernández, 2013).

5.3. Pretratamientos químicos y termoquímicos

Reducen los compuestos orgánicos poco biodegradables mediante la agregación de compuestos químicos tales como ácidos o bases fuertes, álcalis u oxidantes o mediante otros procesos como la ozonización, que se usa para mejorar la producción de biogás y la tasa de hidrólisis (Fernández, 2013). El resultado del pretratamiento químico depende del tipo de método aplicado y de las características de los sustratos. Por ello, no es apropiado para sustratos fácilmente biodegradables que abarcan altas cantidades de hidratos de carbono debido a su degradación acelerada, pero sí puede beneficiarse de un claro efecto positivo en sustratos ricos en lignina (Ariunbaatar, et al., 2014). Los pretratamientos químicos también pueden poseer otros objetivos, como el ajuste de pH en el caso de sustratos ácidos o el incremento de la capacidad tampón. Se pueden distinguir entre (Fernández, 2013):

- ✓ Hidrólisis ácida: Se trata de un proceso químico que emplea ácidos para modificar las cadenas de polisacáridos que conforman la biomasa en sus monómeros elementales. Este tipo de hidrólisis usa distintas clases de ácidos: clorhídrico, sulfúrico, fosfórico, nítrico y fórmico, siendo utilizados solamente a nivel industrial los ácidos clorhídrico y sulfúrico (Fernández, 2013). El pretratamiento con ácido es más deseable para los sustratos lignocelulósicos, ya que los microbios hidrolíticos son aptos para aclimatarsen a las condiciones ácidas (Ariunbaatar, et al., 2014). La principal reacción que sucede durante el pretratamiento ácido es la hidrólisis de hemicelulosa, originándose fundamentalmente xilano como glucomanano (Fernández, 2013). De este modo, un pretratamiento ácido fuerte puede dar como resultado la creación de subproductos inhibidores, por lo que se pretende evitarlo. Por otro lado, estos pretratamientos implican la pérdida de azúcar fermentable debido a la mayor degradación de sustratos complejos, un alto coste de ácidos, así como el coste adicional para neutralizar las condiciones ácidas antes del proceso de digestión anaerobia (Ariunbaatar, et al., 2014). Las variables analizadas son la temperatura, la concentración del ácido y la razón sólido / líquido (Fernández, 2013).

- ✓ Oxidación húmeda: Este tipo de pretratamiento se utiliza para la producción de etanol y biogás (Taherzadeh & Karimi, 2008). Consiste en la adición de un compuesto oxidante, como el peróxido de hidrógeno o ácido paracético a la biomasa o residuo que se encuentra sumergido en el agua. Durante el pretratamiento oxidativo pueden tener lugar reacciones como sustitución electrofílica, el desplazamiento de cadenas laterales, rompimiento de vínculos de alquil, aril, éter o de núcleos aromáticos (Fernández, 2013). Los parámetros más importantes de la oxidación húmeda son la temperatura, el tiempo de reacción y la presión de oxígeno (Taherzadeh & Karimi, 2008).
- ✓ Tratamiento con ozono: Se realiza a temperatura ambiente y no conduce a compuestos inhibidores. Sin embargo, puede ser muy costoso, ya que se requiere una gran cantidad de ozono (Taherzadeh & Karimi, 2008). La ozonización puede desinfectar los patógenos presentes, ya que el ozono es un oxidante fuerte que se descompone en radicales y reacciona con sustratos orgánicos de forma directa o indirecta. La reacción directa depende de la estructura del reactivo, mientras que la reacción indirecta se basa en los radicales hidroxilos. Como resultado, los compuestos recalcitrantes se vuelven más biodegradables y accesibles a las bacterias anaeróbicas (Ariunbaatar, et al., 2014). Los principales parámetros de este pretratamiento son el contenido de humedad de la muestra, el tamaño de partícula y la concentración de ozono en el flujo de gas (Taherzadeh & Karimi, 2008).
- ✓ Hidrólisis con álcalis: Se lleva a cabo con reactivos como NaOH, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y Na_2CO_3 (Fernández, 2013). Durante el pretratamiento con álcali, las primeras reacciones que se obtienen son la solvatación y saponización que inducen la hinchazón de los sólidos. Como resultado, el área de la superficie específica aumenta y los sustratos son fácilmente accesibles para los microbios anaerobios. Por tanto, la solubilización de DQO aumenta a través de varias reacciones simultáneas, tales como la saponificación de ácidos urónicos y acetil ésteres, y la neutralización de varios ácidos creados por la degradación de las partículas. De esta forma, cuando los sustratos son pretratados con métodos alcalinos, la biomasa en sí misma consume algo de álcali, por lo que pueden requerirse reactivos alcalinos más altos para lograr la mejora de la digestión anaeróbica (Ariunbaatar, et al., 2014).

- ✓ Tratamiento con solventes orgánicos: En el proceso, un compuesto orgánico acuoso se combina con un ácido inorgánico (HCl o H₂SO₄), empleándose para romper el interior de la lignina y los puentes de hemicelulosa. Para ello, se utilizan disolventes orgánicos como metanol, etanol, acetona, etilenglicol y alcohol tetrahidrofurfurílico, aunque también se pueden usar ciertos ácidos orgánicos como catalizadores en el proceso (Fernández, 2013).

5.4. Pretratamientos biológicos

Su finalidad es mejorar el proceso de hidrólisis en una etapa adicional antes del proceso principal de digestión (Carrère, et al., 2010). Estos pretratamientos consiguen la degradación de determinados compuestos mediante la inoculación con bacterias específicas o la adición de enzimas. El ensilado se considera un pretratamiento biológico, ya que se trata de una fermentación ácido-láctica de tipo inespecífico, cuyo objetivo primordial es el mantenimiento del material. Así mismo, el ensilado se aplica a sustratos vegetales que se recogen una o dos veces al año, aunque en algunos casos se consigue un incremento de la productividad de biogás, puesto que en dicho proceso se produce una hidrólisis de las macromoléculas (Fernández, 2013).

6. CONCLUSIONES

A partir de la revisión bibliográfica realizada, se observa el gran valor que tiene el tratamiento de los residuos sólidos orgánicos como un recurso desde el punto de vista medioambiental y tecnológico, así como la necesidad de dotarlos de una valorización energética empleando el biogás obtenido en la digestión anaerobia como energía renovable de bajo coste.

Por otro lado, se puede concluir que la digestión anaerobia es un proceso muy eficiente porque presenta un gran número de ventajas. Sin embargo, es importante tener en cuenta las características de los residuos ya que de ellas dependen los valores de determinados parámetros. De esta forma, podemos destacar algunos de los parámetros operacionales que afectan al proceso de digestión anaerobia, como la temperatura y el tiempo hidráulico de retención, que son los más empleados para conseguir una mayor calidad y cantidad de biogás en dicho proceso. Así mismo, la calidad del biogás originado depende de la optimización de los parámetros de operación, puesto que estos determinan la actividad microbiológica dentro del reactor. Además, el biogás supone una solución viable para preservar el medio ambiente, ya que en la digestión anaerobia los residuos que han

quedado fuera de uso pueden utilizarse para generar energía y mejorar los abonos, cumpliendo así un doble objetivo de recuperación energética y saneamiento residual.

En la actualidad, las tecnologías que más se utilizan en la producción de biogás se basan en los sistemas continuos y discontinuos, aunque los continuos presentan una desventaja que radica en el consumo de energía necesaria para calentar los digestores en un rango de temperatura determinado.

Por último, cabe destacar la relevancia que tiene el uso de los métodos de pretratamientos para la mejora de la digestión anaerobia con el objetivo de alcanzar un mayor rendimiento en la misma. Así mismo, la composición de un residuo determinado es clave a la hora de escoger el pretratamiento más apropiado, aunque se ha comprobado que el térmico suele ser el más efectivo.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agencia Andaluza de la Energía. (2011). *Estudio básico del biogás*. Retrieved from https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/documentos/estudio_basico_del_biogas_0.pdf

Ariunbaatar, J., Panico, A., Esposito, G., Pirozzi, F., Lens, P. N. L. (2014). Pretreatment methods to enhance anaerobic digestion of organic solid waste. *Applied Energy*, 123, 143-156.

<https://sci-hub.tw/https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261914001718>

Borrueal Cabrera, R. (2017). *Análisis de la valorización de residuos ganaderos para la producción de biogás. Ingeniería conceptual de una planta para 750 cabezas de ganado*. Trabajo Fin de Grado. Universidad de Sevilla. Retrieved from

<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/91523/fichero/TFG+RAM%C3%93N+BORRUEAL+CABRERA+final+definitivo.pdf>

Campos, E., Flotats, X. (2004). *Procesos biológicos: La digestión anaerobia y el compostaje*.

Carrère, H., Dumas, C., Battimelli, A., Batstone, D. J., Delgenès, J. P., Steyer, J. P., Ferrer, I. (2010). Pretreatment methods to improve sludge anaerobic degradability: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 183(1-3), 1-15.

<https://sci->

[hub.tw/https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389410008824](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389410008824)

Cendales Ladino, E. D. (2011). *Producción de biogás mediante la codigestión anaeróbica de la mezcla de residuos cítricos y estiércol bovino para su utilización como fuente de energía renovable*. Tesis. Universidad Nacional de Colombia. Retrieved from <http://bdigital.unal.edu.co/4100/1/edwindariocendalesladino.2011.parte1.pdf>

Cuesta López, J. (2015). *Obtención de biogás a partir de Residuos Sólidos Urbanos para su inyección a Red*. Trabajo Fin de Grado. Universidad Carlos III de Madrid. Retrieved from

https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/23542/TFG_Jorge_Cuesta_Lopez.pdf

Díaz-Báez, M. C., Espitia Vargas, S. E., Molina Pérez, F. (2002). *Digestión Anaerobia. Una aproximación a la tecnología*. Universidad Nacional de Colombia.

Díaz de Basurto, A. (2013). *Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor anaerobio con residuos orgánicos generados en el mercado de Tiquipaya (Bolivia)*. Tesis de Máster. Universidad Politécnica de Cataluña. Retrieved from

https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/20647/TFM_AITOR%20DIAZ%20ODE%20BASURTO.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Díez Fernández, H. (2016). *Cálculo de la estimación de biogás generado a partir de residuos agroindustriales en el Principado de Asturias*. Trabajo Fin de Máster. Universidad de León. Retrieved from

[https://buleria.unileon.es/bitstream/handle/10612/5745/Dic2016_muimre_71455791N.p](https://buleria.unileon.es/bitstream/handle/10612/5745/Dic2016_muimre_71455791N.pdf?sequence=1)
[df?sequence=1](https://buleria.unileon.es/bitstream/handle/10612/5745/Dic2016_muimre_71455791N.pdf?sequence=1)

Fernández Cegri, V. (Coord.). (2013). *Tratamiento integral de los residuos sólidos generados en el proceso de extracción de la harina de girasol mediante la combinación de distintos pretratamientos y procesos de digestión anaerobia*. Tesis Doctoral. Universidad de Sevilla. Retrieved from

<https://idus.us.es/xmlui/bitstream/handle/11441/58610/2013fernatrata.pdf?sequence=1>

Ferreira, L. C. G. (2013). *Evaluación De La Biodegradabilidad Anaerobia De Residuos Orgánicos Pre-Tratados Térmicamente*. Tesis Doctoral. Universidad de Valladolid. Retrieved from <http://uvadoc.uva.es/bitstream/10324/4439/1/TESIS476-140226.pdf>

González Cabrera, A. M. (2014). *Estudio técnico-económico para la producción de biogás a partir de residuos agrícolas mediante digestión anaerobia*. Trabajo Fin de Máster. Universidad de Sevilla. Retrieved from

<https://idus.us.es/xmlui/bitstream/handle/11441/27048/TFM%20Gonz%C3%A1lez%20Cabrera%2c%20Ana%20Mar%C3%ADa%20-%20copia.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2007). *Biomasa: Digestores anaerobios*. Retrieved from

http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10737_Biomasa_digestores_07_a_996b846.pdf

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2011). *Situación y Potencial de Generación de Biogás*. Retrieved from

http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_11227_e16_biogas_db43a675.pdf

Jaramillo Henao, G., Zapata Márquez, L. M. (2008). *Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos en Colombia*. Universidad de Antioquia. Retrieved from

<http://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/45/1/AprovechamientoRSOUenColombia.pdf>

Khalid, A., Arshad, M., Anjum, M., Mahmood, T., Dawson, L. (2011). The anaerobic digestion of solid organic waste. *Waste Management*, 31(8), 1737-1744.

<https://sci->

[hub.tw/https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X11001668](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X11001668)

Li, Y., Park, S. Y., Zhu, J. (2010). Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 821-826.

<https://sci-hub.tw/10.1016/j.rser.2010.07.042>

Lorenzo Acosta, Y., Obaya Abreu, M. C. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 39(1), 35-48.

MAPAMA. (2018). *Terminología*. Retrieved from

<https://www.mapama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/domesticos/gestion/terminologia/>

Martín González, S. (1997). *Producción y recuperación del biogás en vertederos controlados de residuos sólidos urbanos. Análisis de variables y modelización*. Tesis Doctoral. Universidad de Oviedo. Retrieved from

<https://www.tdx.cat/handle/10803/11147>

Martínez Hernández, C. M., García López, Y. (2016). Utilización de pre-tratamientos básicos y específicos para la producción de biogás. Revisión y análisis. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 25(3), 81-92.

scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2071-00542016000300009

Mata-Alvarez, J., Macé, S., Llabrés, P. (2000). Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. *Bioresource Technology*, 74(1), 3-16.

<https://sci->

[hub.tw/https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852400000237](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852400000237)

Núñez-Pintado, L. (2017). *Modelamiento y control del proceso de digestión anaerobia para la producción de biogás a partir de residuos orgánicos y/o aguas residuales*. Tesis. Universidad de Piura. Retrieved from

https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/2986/MAS_IME_AUT_016.pdf?sequence=1

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2011). *Manual de Biogás*. Retrieved from

<http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf>

Ortiz Ortiz, L. J. (2017). *Análisis bibliográfico de los residuos sólidos orgánicos generados en el municipio de San Vicente de Chucurí (Santander) en los años 2010 a 2015*. Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Retrieved from

<https://stadium.unad.edu.co/preview/UNAD.php?url=/bitstream/10596/13803/1/1102718712.pdf>

Palau Estevan, C. V. (2016). *Digestión anaerobia de residuos de biomasa para la producción de biogás*. Universidad Politécnica de Valencia. Retrieved from

<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/68331/Palau%20-%20Digesti%C3%B3n%20anaerobia%20de%20residuos%20de%20biomasa%20para%20la%20producci%C3%B3n%20de%20biog%C3%A1s.%20Fundamentos..pdf?sequence=1>

Ramos Marín, S. (2015). *Biodegradabilidad anaerobia de fracción orgánica de residuo urbano pretratado mediante esterilización*. Trabajo Fin de Grado. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía. Retrieved from

http://oa.upm.es/48689/1/TFG_SARA_RAMOS_MARIN.pdf

Rey Devesa, L. (2014). *Obtención de biogás a partir de codigestión anaerobia de microalgas y fangos de EDAR*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona. Retrieved from

<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/22006/PFCfinalLara.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Reyes Aguilera, E. A. (2017). Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos. *Revista Científica de FAREM-Estelí. Medio ambiente, tecnología y desarrollo humano*, 60-81.

Rico Barrachina, J. (2015). *Características y valorización de los residuos de origen urbano*. Trabajo Fin de Máster. Universidad Miguel Hernández. Retrieved from <http://studylib.es/doc/8079004/caracter%C3%ADsticas-y-valorizaci%C3%B3n-de-los-residuos-de>

Rodríguez Perdígón, L. A. (2014). *Viabilidad técnica para producción de biogás a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos*. Tesis. Universidad EAN. Retrieved from

<http://repository.ean.edu.co/bitstream/handle/10882/1560/RodriguezLuis2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Taherzadeh, M. J., Karimi, K. (2008). Pretreatment of Lignocellulosic Wastes to Improve Ethanol and Biogas Production: A Review. *International Journal of Molecular Sciences*, 9(9), 1621-1651. <http://www.mdpi.com/1422-0067/9/9/1621/htm>

Weiland, P. (2009). Biogas production: current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85(4), 849-860.

<https://sci-hub.tw/https://link.springer.com/article/10.1007/s00253-009-2246-7>

Zahedi, S., Sales, D., Romero, L.I., Solera, R. (2013). Optimisation of single-phase dry-thermophilic anaerobic digestion under high organic loading rates of industrial municipal solid waste: population dynamics. *Bioresource Technology*, 146, 109-117.

8. ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación general de los residuos sólidos.	2
Tabla 2: Principales ventajas e inconvenientes del proceso de digestión anaerobia.	8
Tabla 3: Principales bacterias que actúan en cada fase.	11
Tabla 4: Clasificación de los distintos parámetros que afectan al proceso de digestión anaerobia.	12
Tabla 5: Composición del biogás.	18